LOCALIZAÇÃO ÓTIMA DE MEDIDORES EM REDES ELÉTRICAS DE GRANDE PORTE VIA COLÔNIA DE FORMIGAS E HEURÍSTICA CONSTRUTIVA

H. R. de Oliveira Rocha
Universidade Federal Fluminense, Instituto de Computação
Rua Passo da Pátria 156 - Bloco E - 3º andar São Domingos Niterói - RJ
hrocha@ic.uff.br

J. C. Stacchini de Souza, M. B. Do Coutto Filho
Universidade Federal Fluminense, Instituto de Computação
Rua Passo da Pátria 156 - Bloco E - 3º andar São Domingos Niterói - RJ
julio@ic.uff.br, mbrown@ic.uff.br

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação da metaheurística Colônia de Formigas combinada com uma heurística construtiva para a obtenção de planos de medição ótimos para a Estimação de Estado em sistemas de potência. O planejamento de sistemas de medição é considerado um problema de otimização da classe NP-Completo e uma estratégia de decomposição do problema é proposta e testada visando à aplicação a sistemas elétricos de grande porte. Testes com os sistemas IEEE 118 e IEEE 300 barras são realizados, com o intuito de avaliar o algoritmo proposto.

PALAVARAS CHAVE. Colônia de Formigas, Estimação de Estado, Supervisão de Redes Elétricas.

Área principal: Metaheurística, Energia Elétrica

ABSTRACT

This work presents an application of the metaheuristic Ant Colony Optimization with a constructive heuristic to obtain optimal metering systems for power system state estimation. The meter placement is considered a NP-Complete problem and a problem decomposition strategy is proposed and tested having in mind the application to large scale power systems. Tests with the IEEE 118 and IEEE 300 bus systems were carried out to validate the proposed algorithm.

KEYWORDS. Ant Colony, State Estimation, Electrical Power Networks Monitoring.

Main area: Metaheuristic, Power Systems

1. Introdução

A Estimação de Estado (EE) compreende aplicativos responsáveis pela construção de uma base de dados completa e confiável, a ser utilizada por funções avançadas em um Sistema de Gerenciamento de Energia, Monticelli (1999). A redundância dos dados é fundamental para o sucesso da EE. Com um nível adequado de redundância, a EE pode lidar com o problema da detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros, além de permitir que a perda temporária de medidas não comprometa a qualidade/confiabilidade das estimativas produzidas. A redundância é avaliada considerando-se número, tipo e distribuição topológica dos pontos de medição em uma rede elétrica, Souza (2005b).

Sistemas de medição altamente redundantes são sempre desejáveis. Uma vez que a quantidade de dados está diretamente relacionada ao investimento em equipamentos de medição e transmissão de informações, muitas vezes a redundância sofre cortes quando há revisão gerencial de alocação de fundos. Por outro lado, durante a operação dos sistemas, mudanças na configuração da rede ou um funcionamento temporariamente inadequado do sistema de aquisição de dados reduzem o nível de redundância para a Estimação de Estado. Até mesmo níveis críticos podem ser alcançados, caracterizando situações de perda iminente de observabilidade e conseqüente desempenho inadequado de rotinas de processamento de erros grosseiros.

Métodos baseados na aplicação de computação evolutiva também foram propostos para a obtenção de planos de medição ótimos, Coser (2001), Souza (2005b), Tafur (2007). No entanto, este é ainda um campo de pesquisa em aberto, sendo desejável o desenvolvimento de métodos que permitam obter soluções de alta qualidade em tempos computacionais que viabilizem a aplicação a sistemas de potência de grande porte.

Neste trabalho, para resolver o problema do planejamento de sistemas de medição para a EE de sistemas de grande porte, é proposto um algoritmo Colônia de Formigas combinado com uma heurística construtiva e também uma estratégia de particionamento da rede elétrica. Para avaliar tal algoritmo foram realizados testes com os sistemas teste IEEE-118 e IEEE-300 barras, Univ (2010), amplamente utilizados na literatura. Os resultados obtidos com e sem o particionamento da rede são apresentados, comparados e discutidos.

2. Planejamento de Sistemas de Medição

A redundância dos dados é fundamental para um processo adequado de EE. O termo redundância refere-se a um excedente de medidas tomadas no sistema em relação a um número mínimo necessário para estimar todas as variáveis de estado.

Quanto maior e mais qualificada for a redundância, maiores serão as chances de se constituir um processo de EE bem sucedido. De forma antagônica, crescem os investimentos em medição e, portanto, uma solução de compromisso entre redundância e custos associados deve ser encontrada.

A alocação de pontos de medição em redes de transmissão pode ser vista como um problema de otimização, onde o objetivo é obter uma solução que minimize os custos de investimento em Unidades Terminais Remotas (UTRs) e medidores, garantindo também um desempenho desejável para a função EE.

O planejamento de sistemas de medição pode ser representado por um problema de otimização formulado como:

$$\text{Min } (C_{med}+C_{UTR}) \tag{1}$$

s/a:

requisito de observabilidade,
requisito de ausência de medidas críticas,
requisito de ausência de conjuntos críticos.

onde C_{med} representa o custo dos medidores e C_{UTR} o custo das UTRs a instalar para que se tenha

um adequado processo de EE.

Na formulação proposta neste trabalho, os requisitos de desempenho considerados são: observabilidade, ausência de medidas e conjuntos críticos. A observação do atendimento a tais requisitos garante a ausência de níveis críticos de redundância, que comprometem o desempenho da função EE e, conseqüentemente, a qualidade da supervisão da rede.

Os aspectos relacionados ao problema de EE e à importância do atendimento aos requisitos de desempenho acima indicados serão apresentados e discutidos nas seções seguintes.

A. Estimação de Estados Linear

Para uma determinada configuração da rede elétrica, o estado operativo do sistema e as medidas a serem processadas se relacionam através de:

$$z = Hx + \varepsilon \tag{2}$$

Sendo z o vetor de medidas, de dimensão (m x 1); x o vetor de estado verdadeiro, de dimensão (n x 1); ε o vetor de erros associados às medidas z; H a matriz Jacobiano de dimensão (m x n), obtida através da linearização das equações de fluxo de potência.

A função objetivo segundo o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) assume a seguinte forma:

$$J(x) = [z - Hx]^T R^{-1} [z - Hx] \tag{3}$$

onde R é a matriz de covariância dos erros das medidas.

B. Análise de Observabilidade

A avaliação do atendimento ao requisito de observabilidade é realizada através da verificação da não singularidade da matriz de ganho G da EE.

$$G = (H^T R^{-1} H) \tag{4}$$

A verificação de deficiência de medidas para a observabilidade da rede é realizada levando-se em conta o desacoplamento entre os conjuntos de grandezas P – θ (potência ativa – ângulo) e Q – V (potência reativa – magnitudes de tensão), Clements (1983). Considerando medidas tomadas aos pares (ativa e reativa), pode-se fazer a análise apenas pelo conjunto P-θ .

C. Processo de Filtragem e Análise Residual

A estimativa do estado $\hat{x}$ que minimiza J(x) pode ser obtida por:

$$\left.\frac{\partial J(x)}{\partial x}\right|_{x=\hat{x}} = H^T R^{-1} \left[z - H(\hat{x}) \right] \tag{5}$$

$$\hat{x} = G^{-1} H^T R^{-1} z \tag{6}$$

Após a estimação das medidas $\hat{z} = h(\hat{x})$, realiza-se a avaliação da consistência dos resultados obtidos, através da análise dos resíduos. O vetor dos resíduos da estimação r é definido como a diferença entre o valor medido e o correspondente valor estimado:

$$r = z - \hat{z} \tag{7}$$

$$r = z - h(\hat{x}) \tag{8}$$

O vetor dos resíduos r pode ser interpretado como uma variável aleatória com distribuição Normal, valor esperado zero e matriz de covariância E, dada por:

$$E = R - H\,(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T \tag{9}$$

Na presença de apenas um erro grosseiro (EG), a medida errônea é aquela que apresenta o maior resíduo normalizado, Handschin (1975). Isto justifica a utilização do teste dos resíduos normalizados em um método de detecção e identificação de EGs.

O vetor dos resíduos *r* é normalizado e submetido ao seguinte teste de validação:

$$r_N(i) = \frac{|r(i)|}{\sigma_E(i)} \leq \gamma \tag{10}$$

$$\sigma_E(i) = \sqrt{E(i,i)} \tag{11}$$

Onde $\sigma_E(i)$ representa o desvio padrão da i-ésima componente do vetor dos resíduos e γ, o limite de detecção. Resíduos normalizados que violam o limite estabelecido indicam a presença de EGs.

Embora existam outros testes para a avaliação dos resultados do processo de filtragem, e.g., o teste J(x) e dos resíduos ponderados, Handschin (1975), neste trabalho será utilizado o teste dos resíduos normalizados, por ser o mais confiável.

D. Identificação de Medidas e Conjuntos Críticos

Uma medida torna-se crítica se sua ausência do conjunto de dados processados leva a rede supervisionada à perda de observabilidade. Um conjunto crítico é definido como sendo aquele formado por um grupo de medidas em que a remoção de qualquer uma delas mesmas torna todas as remanescentes do grupo medidas críticas. Portanto, a presença de medidas críticas e conjuntos críticos está associada a condições inadequadas de redundância, onde a perda de observabilidade é iminente e o tratamento de erros grosseiros em medidas fica comprometido. Cabe ressaltar que erros grosseiros em medidas críticas não podem ser sequer detectados, enquanto medidas pertencentes a conjuntos críticos portadoras de erros grosseiros não podem ser identificadas, Monticelli (1999). Isto justifica a consideração das restrições apresentadas na formulação do problema de otimização descrito em (1).

Para a identificação de medidas e conjuntos críticos será considerada a metodologia apresentada em Coutto (2007).

3. Otimização baseada em Colônia de Formigas

Nos últimos anos, novas técnicas computacionais têm sido criadas, inspiradas em mecanismos encontrados na natureza. Estas técnicas são englobadas pela área chamada Computação Bio-inspirada. Esta provê soluções motivadas biologicamente para muitos problemas reais, um exemplo destas é a Otimização baseada em Colônia de Formigas (ACO).

A ACO, Dorigo (1991), é uma metaheurística baseada na estrutura e no comportamento de colônias de formigas, e foi aplicada com sucesso a vários problemas de otimização, Shmygelska, Hoos (2005), Merkle, Middendorf (2000), Acan (2004).

As formigas podem lidar com tarefas complexas agindo coletivamente. Esse comportamento coletivo é realizado através da emissão de uma substância química chamada feromônio. Durante seu movimento, as formigas depositam feromônio nos caminhos que percorrem. A presença de feromônio num caminho atrai outras formigas. Assim, o feromônio é peça chave na troca de informação entre as formigas, possibilitando a realização de muitas tarefas importantes.

É bom notar que a maior parte das abordagens de ACO, apesar de serem inspiradas pelos paradigmas encontrados em formigas, não são uma réplica dos mesmos. Características das formigas podem estar ausentes e outras técnicas adicionais podem ser usadas para complementar o uso de feromônios. Aspectos teóricos e práticos sobre a metaheurística ACO podem ser encontrados na literatura técnica, Dorigo (1991).

4. Heurística Construtiva

Este trabalho propõe um modelo inspirado na metaheurística ACO, para a solução do problema do planejamento de sistemas de medição para EE. Alterações no algoritmo ACO foram realizadas de forma a torná-lo mais adequado à solução do problema em questão.

Para a realização deste trabalho, foi criada uma heurística capaz de atender às diversas características da alocação de medidores em uma rede elétrica. Como toda heurística, esse algoritmo não garante necessariamente a obtenção da solução ótima global, mas permite chegar a uma solução de alta qualidade com relação aos objetivos desejados. Essa solução é obtida em tempo polinomial.

A. Características de Planos de Medição

Para a definição do algoritmo construtivo são levadas em consideração diversas características inerentes ao problema de alocação de medidores, Rocha (2008), as quais serão descritas a seguir:

A1. Abrangência da Observabilidade

Uma UTR (e respectivos medidores associados) alocada em uma barra que apresenta um maior número de conexões com outras barras é capaz de permitir a observabilidade de uma maior área da rede elétrica, como é ilustrado na Figura 1.

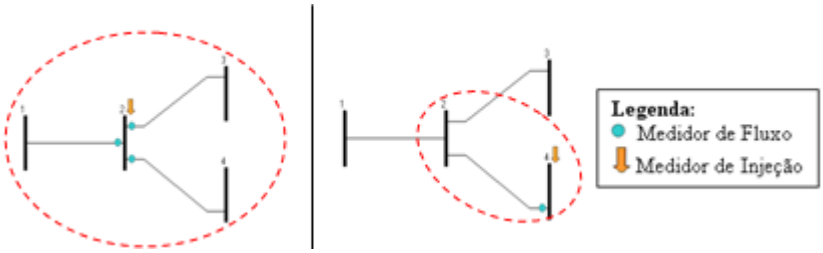

Figura 1: Áreas observadas

A partir da observação e análise de soluções obtidas na literatura para o problema (1), utilizando diferentes técnicas de otimização, é possível extrair características que podem ser utilizadas na formulação de heurísticas visando tornar o processo de busca mais eficiente. A seguir serão apresentadas características observadas em função do tipo de rede a ser supervisionada.

A2. Redes do tipo radial

Para garantir as restrições de observabilidade e medidas críticas, o estado das barras com características do tipo radial devem ser relacionados pelas equações correspondentes a pelo menos duas medidas. De outro modo, pode surgir um ramo irrelevante (sem medidas de fluxo ou de injeção em seus terminais), sendo o sistema neste caso não observável. Diferentes situações podem ser exemplificadas utilizando as redes das Figuras 2 e 3. Para o caso dos conjuntos críticos é necessário que todas as barras tenham uma UTR e respectivos medidores, conforme mostra a Figura 4.

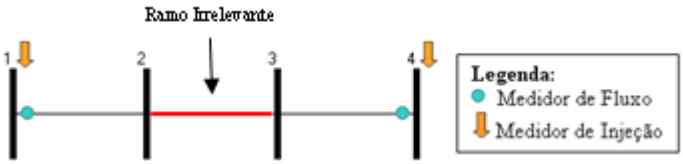

Figura 2: Rede não observável

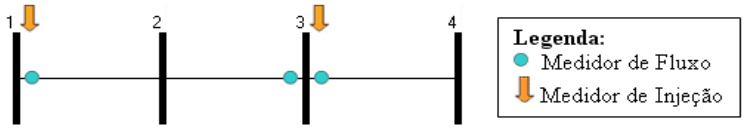

Figura 3: Rede Observável sem medidas críticas.

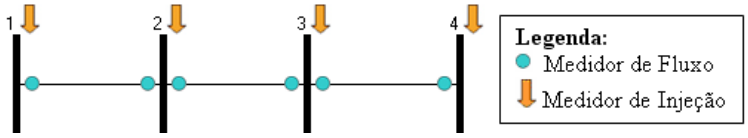

Figura 4: Rede Observável sem conjuntos críticos

A3. Redes do tipo malha

Para garantir as restrições de observabilidade e ausência de medidas críticas, os estados das barras que pertencem a uma malha podem ser relacionados por pelo menos um medidor alocado na própria barra ou nas barras adjacentes, como visto na Figura 5. Para o caso dos conjuntos críticos é comumente necessário que uma barra seja observada por medidas associadas a UTRs diferentes, o que é ilustrado na Figura 6.

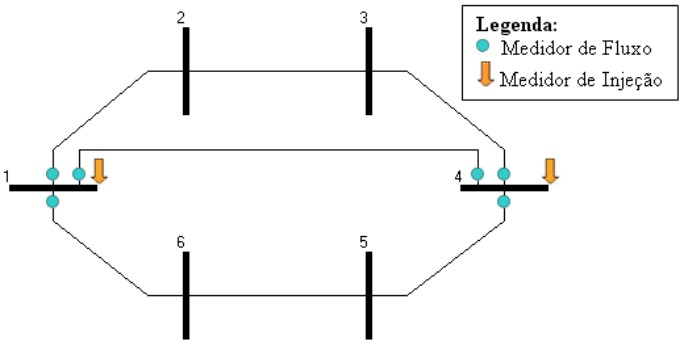

Figura 5: Sistema de Medição para Observabilidade e Ausência de Medidas Críticas

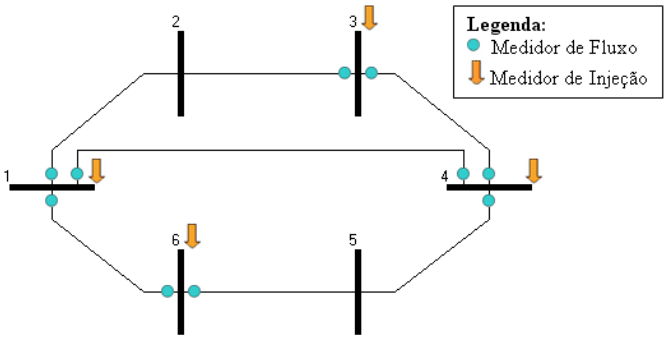

Figura 6: Sistema de Medição para Ausência de Conjuntos Críticos

As combinações que podem ser encontradas nas redes em malha são mais variadas do que em redes radiais. Além disso, as redes elétricas apresentam combinações de trechos radiais e em malha interconectados, gerando uma maior diversidade de situações. Porém, com base nas características descritas, é possível construir heurísticas que levem a boas soluções, as quais podem ser posteriormente refinadas.

B. Algoritmo Construtivo

A heurística inicia criando quatro listas que se alteram dinâmicamente durante o processo de construção do plano de medição.

L1: contém as barras do sistema que são elegíveis para alocação de URTs, ordenadas de forma decrescente em função do número de ramos a elas conectados;

L2: contém as barras onde são alocadas UTRs;

L3: contém as barras já observadas para fins de EE e não mais elegíveis para alocação de UTR;

L4: contém a contagem do número de vezes que o estado de cada barra é relacionado pelas equações das medidas já instaladas (associadas às UTRs em L2);

A seguir são descritos os passos do algoritmo construtivo proposto, tendo em mente o atendimento aos requisitos de: observabilidade, ausência de medidas e conjuntos críticos, ausência de UTRs críticas e de conjunto crítico de UTRs.

(i) Criar a lista L1, que contém as barras do sistema ordenadas decrescentemente pelo número de conexões. Inicialmente, L2 e L3 estão vazias e as contagens em L4 são nulas.

(ii) Selecionar a próxima barra i em L1 (aquela com maior número de conexões) e transferi-la para L2, considerar a instalação de uma UTR na barra i (e medidas associadas);

(iii) Atualizar em L4 o número de vezes que o estado de cada barra adjacente à barra i é observado por medidores de fluxo;

(iv) Criar uma roleta com número de cavidades igual ao número de conexões n da barra selecionada i, cada cavidade representando um número inteiro diferente entre 1 e n, possuindo área proporcional a tal número. Executar a roleta e obter o número de conexões a ser comparado com o das barras adjacentes à barra i. É fácil perceber que cavidades que representam números de conexões maiores (maior área) têm maior chance de serem selecionadas.

(v) Verificar se é possível descartar a alocação de UTRs nas barras adjacentes à barra i, a partir das informações em L4. Levando-se em conta os requisitos de redundância desejados:

(v.1) Caso apenas os requisitos de observabilidade e ausência de medidas críticas sejam almejados, a alocação de uma UTR em uma barra k, adjacente a i, será descartada quando:
- Barra k pertence à uma malha, seu estado é observado por ao menos uma medida de fluxo e o seu número de conexões (contagem atual em L4) é menor ou igual ao obtido pela roleta;
- Barra k pertence a trecho radial, seu estado é observado por ao menos duas medidas de fluxo em UTRs distintas;
- Barra k é terminal e seu estado é observado por ao menos uma medida de fluxo.

(v.2) Caso o requisito de ausência de conjuntos críticos (o qual englobará os anteriores) seja desejado, a alocação de uma UTR em uma barra k, adjacente a i, será descartada quando pertencente à uma malha, sendo seu estado observado por ao menos duas medidas de fluxo e o seu número de conexões menor ou igual ao obtido pela roleta. Para este requisito, uma UTR será sempre alocada em barras pertencentes a trecho radial ou terminais.

(vi) As barras adjacentes nas quais a alocação de UTR foi descartada no passo (v) são

transferidas para L3, enquanto as demais permanecem em L1;

(vii) Enquanto houver elementos em L1, retornar ao passo 2. Caso L1 se torne uma lista vazia, o algoritmo construtivo é encerrado.

É importante ressaltar que os procedimentos descritos levam sempre a planos de medição viáveis, no que diz respeito ao atendimento ao requisito de observabilidade, ausência de medidas críticas e/ou ausência de conjuntos críticos. O atendimento ao requisito de observabilidade e ausência de medidas e conjuntos críticos foi explorado em Rocha (2008), mas sem considerar o particionamento da rede para aplicação a sistemas de grande porte.

5. Otimização dos Planos de Medição

O método proposto neste trabalho emprega um ACO combinado com a heurística construtiva apresentada na Seção 4, para a otimização de planos de medição. Além disso, a aplicação a sistemas de grande porte é baseada em uma estratégia de decomposição do problema. Esta seção descreve a abordagem proposta.

A. ACO com Heurística Construtiva

A metodologia proposta é composta por duas etapas. Na primeira etapa, o ACO usa o algoritmo construtivo, buscando obter soluções com um menor número possível de UTRs. Na segunda etapa, faz-se uma busca local para efetuar um refinamento de modo a se obter um número mínimo de medidas na solução proposta.

No ACO, um conjunto de soluções é gerado a cada iteração, utilizando-se a heurística construtiva. É importante observar que a heurística construtiva tem uma característica não derterminística, em função da roleta empregada no passo (iv), a qual permite que a escolha de barras onde não serão alocadas UTRs seja feita de forma probabilística. Porém, de acordo com o passo (ii), a escolha da primeira barra escolhida para alocação de UTR é feita de forma determinística, sendo sempre escolhida aquela que apresenta o maior número de conexões. Isto tende a dificultar a exploração do espaço de soluções e a obtenção de planos de medição de boa qualidade. Dessa maneira, o passo (ii) da heurística construtiva apresentada na seção anterior é alterado e a geração de cada solução proposta se inicia também com o emprego de uma roleta, em que cada cavidade representa uma barra do sistema, sendo a área de cada cavidade proporcional à quantidade de feromônio em cada barra (que no início do processo é igual ao número de conexões de cada barra).O algoritmo construtivo é empregado até que um plano de medição seja gerado. Empregando este procedimento, diferentes soluções são geradas a cada iteração do processo de otimização via ACO.

Ao final da primeira iteração, a melhor solução obtida é declarada a solução atual e a quantidade de feromônio em cada barra onde é proposta alocação de UTR é atualizada, adicionando-se uma unidade à quantidade anteriormente presente. Isto possibilita que na próxima iteração essas barras tenham maior probabilidade de serem escolhidas na roleta. Em cada iteração subseqüente, a melhor solução obtida é comparada com a solução atual (melhor solução obtida nas iterações anteriores) e caso seja melhor passará a ser a nova solução atual.

O algoritmo proposto consiste dos seguintes passos:

(i) Definir o número máximo de iterações e o número de formigas, ns (número de soluções propostas por iteração). Fazer a quantidade de feromônios em cada barra igual ao número de conexões que delas partem. Inicializar o contador de iterações;

(ii) Se o número máximo de iterações é atingido, o algoritmo é encerrado e a solução atual é a solução do problema. Caso contrário, ir para o passo (iii);

(iii) Gerar ns soluções utilizando a heurística construtiva e avaliar cada solução utilizando a função objetivo correspondente ao requisito desejado;

(iv) Atualizar a solução do problema. Na primeira iteração, escolher a melhor solução obtida no passo (iii) como a solução atual. Nas demais iterações, a melhor solução avaliada no passo (iii) é comparada com a solução atual e, caso seja superior, passará a ser a nova solução atual.

(v) A quantidade de feromônio é atualizada somando-se uma unidade à quantidade previamente existente em cada barra onde, na solução atual, é proposta alocação de UTR;

(vi) Incrementar o número de iterações e voltar ao passo (ii).

Após a última iteração do algoritmo ACO é obtida uma solução com um número reduzido de UTRs e sobre esta solução realiza-se uma busca local para o refinamento das medidas não necessárias ao atendimento dos requisitos de desempenho considerados.

Na estratégia adotada neste trabalho, em um primeiro estágio o vetor solução tem dimensão igual ao número de barras onde se pode alocar UTRs, sendo o problema tratado pelo algoritmo ACO como aquele de alocação ótima de UTRs (e todos os respectivos medidores associados), cujo objetivo é minimizar o número de UTRs alocadas. Em um segundo estágio, o vetor solução tem dimensão igual ao número total de medidas inicalmente alocadas e um algoritmo de busca local é empregado para refinar a solução obtida pelo ACO, minimizando o número total de medidas, mas preservando o atendimento aos requisitos estabelecidos.

Na fase de busca local, procede-se à fase de refinamento da solução. Utilizou-se um algoritmo de remoção de medidas. Neste algoritmo, a melhoria do plano de medição é buscada pela remoção de medidores em excesso uma de cada vez.

B. Decomposição do Problema

A idéia básica aqui é, em uma primeira etapa, dividir o problema em subproblemas menores, para os quais é aplicado o método apresentado na seção anterior. Em uma segunda etapa, as soluções obtidas para os subproblemas são coordenadas de modo a obter uma solução final. A grande vantagem neste caso é que, na primeira etapa, os subproblemas são resolvidos de forma totalmente independente. Para cada subproblema o processo de otimização se dá em um espaço de busca reduzido, podendo ser mais eficaz na busca pela solução ótima e mais eficiente computacionalmente.

Na estratégia de decomposição proposta neste trabalho o sistema é dividido em subsistemas independentes e para cada um desses subsistemas é executado o algoritmo da Seção 5.A. Após obtidas as soluções para cada subsistema é necessário verificar se, para o sistema como um todo, o conjunto de UTRs alocadas satisfaz os requisitos de redundância estabelecidos. Para tal, é novamente considerado um único problema, onde é verificada a necessidade de alocação de uma ou mais UTRs para satisfazer todos os requisitos de desempenho, assim como é verificada a possibilidade de remoção de UTRs em excesso. A necessidade de realizar tal refinamento se deve ao fato de que, na decomposição do problema, são desconsideradas as interligações entre os subsistemas. Isto leva a perda de informação relevante para decidir, durante a solução de cada subproblema, sobre a necessidade e/ou conveniência de instalação de UTRs nas barras de fronteira ou em barras vizinhas a elas. Note que as barras de fronteira de um subsistema serão aquelas barras que possuem interligação direta com barras de outro subsistema. Em geral, espera-se que na etapa de refinamento eventuais acréscimos/eliminações de UTRs ocorram em barras na fronteira entre áreas ou em sua vizinhança.

O algoritmo proposto é descrito a seguir :

1. Dividir o sistema original em N subsistemas removendo as conexões de interligação;
2. Resolver os N subsistemas independentes usando o algoritmo da Seção 5.A;
3. Armazenar as UTRs alocadas durante a resolução dos subsistemas;
4. Restaurar o sistema original com as UTRs alocadas nos subsistemas;
5. Empregar a heurística construtiva para verificar a necessidade de alocação e/ou a possibilidade de remoção de UTRs nas regiões de fronteira;
6. Remover medidas em excesso (se houverem) alocadas em cada UTR;

A Figura 7 ilustra o sistema IEE-118 divido em três subsistemas.

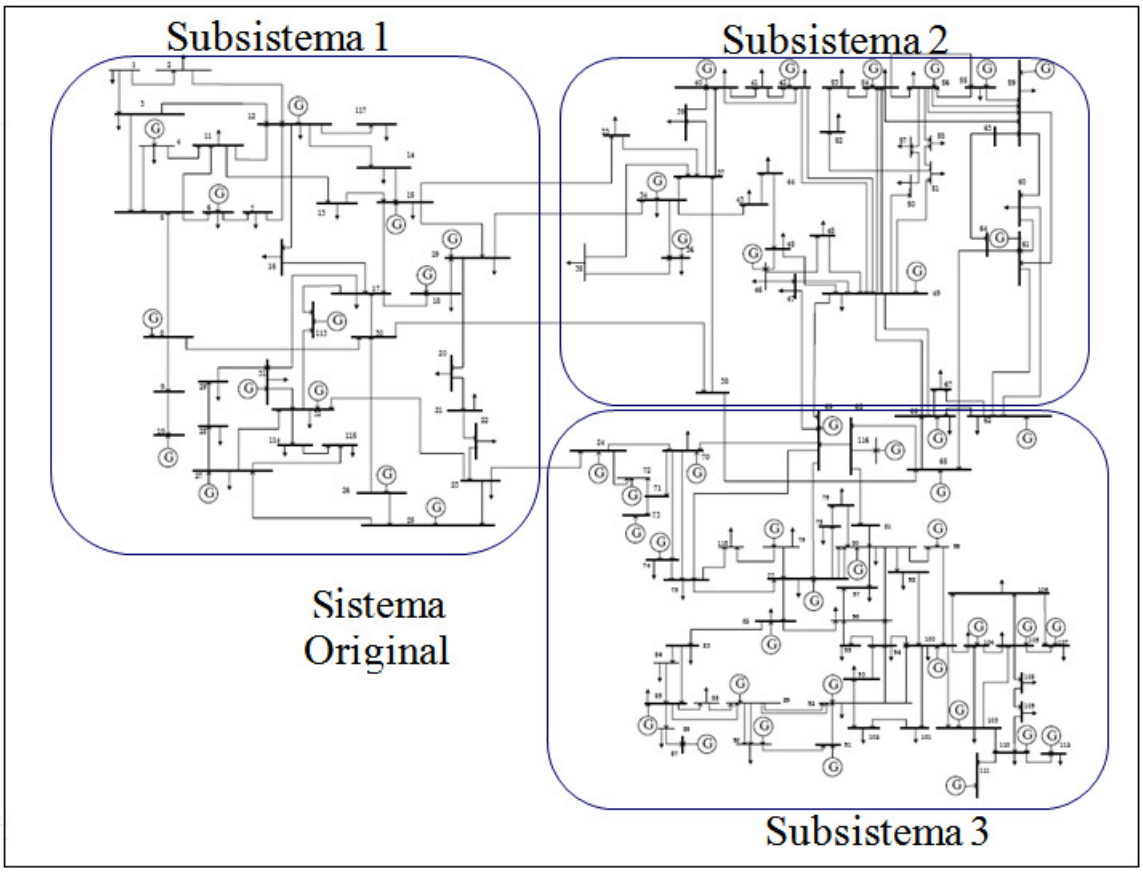

Figura 7- Sistema IEE-118 dividido em três subsistemas.

6. Testes e Resultados

Para avaliar o desempenho da metodologia proposta foram realizados testes com os sistemas IEEE 1118 e IEEE 300 barras. Para cada sistema, foram avaliados os requisitos de Observabilidade, Ausência de Medidas Críticas e Ausência de Medidas em Conjuntos Críticos.

Os resultados obtidos para o sistema IEEE 118 barras, utilizando a metodologia proposta (em dois estágios) são apresentados na Tabela 1. A Tabela 1 apresenta ainda, para fins de comparação, resultados obtidos para o sistema como um todo (um único estágio), sem considerar a etapa de solução de cada subsistema, além de outros obtidos na literatura. Em todas as simulações foi considerado um custo relativo de 100,0 unidades monetárias para uma UTR e de 4,5 unidades monetárias para um medidor.

Tabela 1. Resultado para o sistema IEEE 118.

Sistema IEEE 118 barras		Obs.	Med. Crit.	Conj. Crít.
Souza (2005a)	Custo ($)	4758,0	4961,5	8009,0
	Tempo (min)	--	--	--
Um Estágio	Custo ($)	4440,0	4480,5	7397,5
	Tempo (min)	1,4	6,0	7,0
Dois Estágios	Custo ($)	4044,5	4085,0	7137,0
	Tempo (min)	1,0	5,0	7,0

Para o Sistema IEEE 300 barras, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultado para o sistema IEEE 300.

Sistema IEEE 300 barras		Obs.	Med. Crit.	Conj. Crít.
Um Estágio	Custo ($)	12116,5	12350,5	22272,5
	Tempo (min)	30	90	300
Dois Estágios	Custo ($)	11625,5	11760,5	22407,0
	Tempo (min)	18	75	176

Os resultados obtidos com os sistemas IEEE 118 e IEEE 300 barras mostram que ao se utilizar a solução em dois estágios é possível, na maioria dos casos, obter soluções melhores que as obtidas quando a decomposição do sistema não é considerada. No que diz respeito á eficiência computacional, notou-se significativa melhora nos tempos de convergência quando se utilizou a solução em dois estágios. É importante notar ainda que, nos casos apresentados, os tempos obtidos para a solução em dois estágios refere-se à soma dos tempos de solução de cada subproblema e do tempo necessário para refinamento da solução final. Como osa solução dos subproblemas são inerentemente independentes e adequados para solução em ambiente paralelo, espera-se uma redução de tempo computacional ainda mais expressiva em tal situação, visto que a solução seqüencial dos subproblemas já se mostrou vantajosa. Tal implementação será alvo de investigação futura. Vale destacar ainda a eficácia do método ACO com heurística construtiva empregado, que, quando comparado com outros resultados da literatura, Souza (2005a), apresentou resultados superiores.

7. Conclusões

Este trabalho apresentou uma aplicação da metaheurística baseada em Colônia de Formigas para a solução do problema de planejamento de sistemas de medição para a estimação de estado em sistemas de potência. O conhecimento extraído da experiência relatada na literatura sobre o problema de planejamento de sistemas de medição foi empregado para a construção de procedimentos heurísticos que compõem as fases do ACO. Ênfase foi dada em definir uma estratégia eficaz e eficiente para a solução de problema em sistemas de grande porte.

O método proposto apresentou excelente desempenho, tendo sido capaz de obter soluções de excelente qualidade em tempos computacionais reduzidos. Neste contexto, pode-se ainda considerar a possibilidade de paralelização do algoritmo, o que diminuirá ainda mais o seu tempo de execução.

8. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, CAPES/CNPq – IEL Nacional – Brasil e FAPERJ, que financiaram em parte a execução desta pesquisa.

Referências

Acan A. (2004), An external memory implementation in ant colony optimization, *In Proceedings of the 4th International Workshop on ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*, pages 73-82, Brussels, Belgium.

Blum C. e Roli A. (2003), Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Comput. Surv.*, 35(3):268-308.

Coser, J., Rolim, J.G. e Simões Costa, A.J.A. (2001), Meter Placement for Power State Estimation: An Approach Based on Genetic Algorithm and Topological Observability Analysis, *Proc. of the ISAP*, Budapest.

Coutto Filho, M.B. Souza, J.C.S., Schilling, M.Th., Handling Critical Data and Observability, *International Journal of Electric Power Components and Systems*, v.35, p.553 - 573, 2007.

Dorigo, M.; Maniezzo, V. e Colorni, A. (1996), Ant System: Otimization by a Colony of Cooperating Agents. *IEEE Trans on System, Man, and Cibernetics-Part B, 26(1): 29-41*.

Clements K. A., Krumpholz G. R. e Davis P. W. (1983), Power system state estimation with measurement deficiency: an observability measurement placement algorithm, *IEEE Trans. PAS*, Vol. PAS-102, pp. 2012-2020.

Handschin E. e Bongers C. (1975), Theorical and practical considerations in the design of state estimators for electric power systems, *Int. Symp. Computerized Operation of Power System (COPOS) Proceedings*, São Carlos, Brasil, pp. 104-136.

Merkle D., Middendorf M. e Schmeck H. (2000), Pheromone evaluation in ant colony optimization, *IEEE Press.*

Monticelli A., *Power system state estimation: A generalized approach*, Kluwer Academic Press, 1999.

Rocha, H. R. O., Tafur, J. E. V., Souza, J. C. S., Do Coutto Filho, M. B, (2008), Metodologia Baseada em Colônia de Formigas paraAlocação de Pontos de Medição em Redes Elétricas. *Anais do XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*.

Souza J. C. S., Do Coutto Filho M. B. e Schilling M. Th. (2005a), Optimal metering systems for monitoring power networks under multiple topological scenarios, *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol 20 No 4, pp 1700-1708.

Souza J. C. S., Do Coutto Filho M. B., Schilling M. Th., Meza E. B. M. e Capdeville C. (2005b), Application of genetic algorithms for planning metering systems in state estimation, *Proceedings in 15th Power Systems Computation Conference*.

Tafur J. E. V., Rocha H. R. O., OCHI L. S., Meza E. B. M., Souza J. C. S., Do Coutto Filho M. B. (2007), Heuristic Grasp for Planning Metering Systems for Electrical Power Network Monitoring, *Proceedings from VI ICORD*, pp. 357-367. Fortaleza, Brasil.

University of Washington (2010), *Power Systems Test Case Archive*, http://www.ee.washington.edu/research/pstca/

Vigliassi, M. P., Piereti, S. A. R., London, Jr. J. B. A., Delbem, A. C. B., Bretas N. G, (2008). Projeto de Sistemas de Medição Confiáveis para Efeito de Estimação de Estado via Algoritmos Evolutivos e Matriz $H\Delta^t$. *Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática*, artigo 41022.